

ТРАНСПОРТ

УДК 621.396.66

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ КОЛЕБАНИЙ
ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЯ

Канд. техн. наук, доц. ГУРСКИЙ Н. Н., асп. КАДЕР КАРАМИ А.

Белорусский национальный технический университет

Сложные колебательные процессы, возникающие при движении автомобиля по неровным дорогам, оказывают влияние на все основные эксплуатационные свойства машины: комфортабельность и плавность хода, устойчивость и управляемость, другие свойства, определяющие его безопасность, комфортность, надежность и экономичность. Перечисленные показатели машины зависят от конструктивных элементов подвески.

В настоящей работе рассматриваются вопросы моделирования и оптимизации параметров подвески по критерию вертикальных виброускорений поддрессоренной массы при движении объекта исследования по двум типам дорог в заданном скоростном диапазоне. В качестве объекта оптимизации принята двухмассовая колебательная система, являющаяся упрощенной моделью локальной подвески автомобиля. Расчетная схема такой колебательной системы представлена на рис. 1.

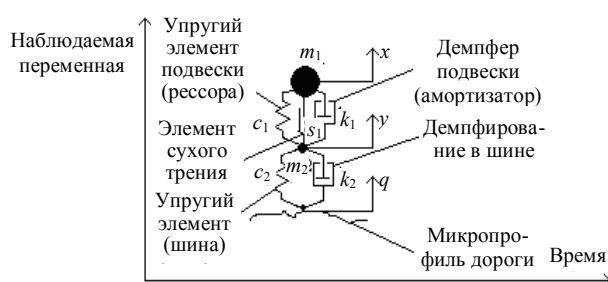


Рис. 1. Расчетная схема подвески автомобиля

Как видно, для описания подвески одного колеса используются: упругая шина c_2 , демпфирование в ней k_2 , неподдрессоренная масса m_2 , рессора c_1 , амортизатор k_1 и сухое трение s_1 , которые поддерживают корпус автомобиля –

поддрессоренную массу m_1 . Во время работы подвески массы m_1 и m_2 совершают вертикальные колебания, определяемые координатами x и y соответственно, и при этом происходит перераспределение энергии колебаний между поддрессоренной и неподдрессоренной массами. Амортизатор поглощает эту энергию, превращая ее в теплоту.

В соответствии со вторым законом Ньютона движение поддрессоренной и неподдрессоренной масс подвески относительно положения статического равновесия можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x} = -(c_1(x-y) + k_1(\dot{x}-\dot{y}) + s_1 \text{Sgn}(\dot{x}-\dot{y})); \\ m_2 \ddot{y} = (c_1(x-y) + k_1(\dot{x}-\dot{y}) + s_1 \text{Sgn}(\dot{x}-\dot{y})) - \\ -(c_2(y-q) + k_2(\dot{y}-\dot{q})); \end{cases} \quad (1)$$

$$t \geq t_0: \quad x(t_0) = x_0, \quad \dot{x}(t_0) = \dot{x}_0;$$

$$y(t_0) = y_0, \quad \dot{y}(t_0) = \dot{y}_0.$$

Здесь c_1 – жесткость рессоры; k_1 – коэффициент сопротивления амортизатора; s_1 – сухое трение в подвеске; c_2 – жесткость шины; k_2 – коэффициент сопротивления в шине.

В табл. 1 приведены принятые в расчетах значения параметров модели.

Таблица 1

Значения параметров модели

Обозначение	Значение
m_1 , кг	5000
m_2 , кг	500
c_1 , Н/м	250000
k_1 , Н·с/м	20000
s_1 , Н·с/м	2000
c_2 , Н/м	5000000
k_2 , Н·с/м	4000

Для моделирования внешней среды (случайных возмущений q) используются дискретные алгоритмы, основанные на фильтрации белого шума линейным фильтром с заданной корреляционной функцией. Математическая модель корреляционной функции, достаточно хорошо аппроксимирующая различные типы микропрофилей дорог, имеет вид:

$$R_q(\tau) = A_1 \sigma^2 e^{-\alpha_1 |\tau|} + A_2 \sigma^2 e^{-\alpha_2 |\tau|} \cos \beta \tau; \quad (2)$$

$$\alpha_1 = \alpha_{1e} v_a; \quad \alpha_2 = \alpha_{2e} v_a; \quad \beta = \beta_e v_a,$$

где v_a – курсовая скорость машины; α_{1e} , α_{2e} , β_e – параметры корреляционной функции, соответствующие единичной скорости машины; σ – среднеквадратичное значение ординат неровностей формируемой реализации; $A_1 + A_2 = 1$.

В расчетах приняты соответствующие параметры корреляционных функций для асфальтовой и грунтовой дорог (табл. 2) [1].

Таблица 2
Параметры корреляционных функций микропрофилей дорог

Тип дороги	Дисперсия ординат σ^2 , м ²	A_1	A_2	α_{1e} , 1/м	α_{2e} , 1/м	β_e , 1/м
Асфальтовая	0,000169	0,65	0,35	0,25	0,05	0,19
Грунтовая	0,0687	0,65	0,35	0,11	0,15	0,36

Чтобы оценить качество сформированной реализации дороги, можно использовать различные критерии, например можно сравнивать близость двух корреляционных функций: полученной по (2) и вычисленной по реализации. На рис. 2 показаны результаты сравнения корреляционных функций ординат участка грунтовой дороги протяженностью $L = 100$ и 1000 м. Видно, что с увеличением длины дороги (времени наблюдения за системой) корреляционная функция по реализации приближается к корреляционной функции (2).

Для количественного оценивания степени взаимоотношения двух корреляционных функций воспользуемся скалярным произведением двух векторов

$$\langle f, g \rangle = \|f\| \|g\| \cos \theta, \quad (3)$$

где f – вектор дискретных отсчетов корреляционной функции, полученный по формуле (2); g – вектор дискретных отсчетов корреляционной функции, вычисленной по реализации случайного процесса; θ – угол между векторами.

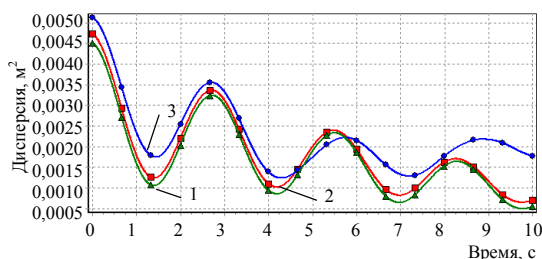


Рис. 2. Корреляционные функции грунтовой дороги: 1 – аналитическая; 2 – по реализации ($L = 1000$ м); 3 – то же ($L = 100$ м)

Из выражения (3) получим:

$$\cos \theta = r = \frac{\langle f, g \rangle}{\|f\| \|g\|}; \quad (4)$$

$$\langle f, g \rangle = \sum_{i=1}^N f_i g_i; \quad \|f\| = \sqrt{\sum_{i=1}^N f_i^2};$$

$$\|g\| = \sqrt{\sum_{i=1}^N g_i^2}.$$

Здесь r – коэффициент корреляции векторов f и g ; N – число точек реализации.

В табл. 3 приведены значения коэффициента корреляции r корреляционной функции (2) и функции, полученной по реализации, в зависимости от длины и типа дороги.

Для оптимизации параметров подвески воспользуемся алгоритмом случайного поиска с ограничениями 1-го и 2-го рода.

Таблица 3
Зависимость коэффициента корреляции от типа и длины дороги

Длина участка, м	Асфальтовая	Грунтовая
100	0,897	0,982
300	0,981	0,991
500	0,997	0,994
700	0,995	0,998
1000	0,993	0,999

В качестве оптимизируемых параметров примем вектор $A = \{a_1 a_2 a_3\}$, компонентами которого

го являются жесткость упругого элемента подвески c_1 и коэффициент сопротивления амортизатора $k_1 = \{k_{1s}, k_{1o}\}$. Здесь k_{1s} и k_{1o} – соответственно коэффициенты сопротивления амортизатора на ходах сжатия и отбоя. Таким образом, вектор оптимизируемых параметров $A = \{c_1, k_{1s}, k_{1o}\}$.

Ограничения 1-го рода: $a_{i\min} \leq a_i \leq a_{i\max}$; $i = 1, \dots, 3$.

Под ограничениями 2-го рода будем понимать вероятностные характеристики (непробой и независание подвески, неотрыв колеса), связанные с деформациями упругих элементов подвески и колеса и отражающие эффективность работы упругих элементов системы поддрессоривания.

Ограничения на непробой и независание подвески имеют вид:

$$P_s[\Delta \leq \Delta_+] \geq \bar{P}_s;$$

$$P_o[\Delta \geq \Delta_-] \geq \bar{P}_o;$$

$$\Delta = x - y,$$

где \bar{P}_s – заданная вероятность непробоев подвески на ходе сжатия; \bar{P}_o – то же независания подвески на ходе отбоя; Δ_+ – ход сжатия; Δ_- – то же отбоя подвески.

Ограничения на неотрыв колеса характеризуются вероятностью $P_k[\cdot]$:

$$P_k[\delta \leq \delta_s] \geq \bar{P}_k; \quad \delta_s = (m_1 + m_2)g / c_2;$$

$$\delta = y - q,$$

где \bar{P}_k – заданная вероятность неотрыва колеса.

Оценку работы подвески (критерий качества системы $J(A)$) будем производить по среднеквадратичным значениям вертикальных ускорений $\ddot{x}(t)$ поддрессоренной массы m_1 , а это значит, что решение задачи оптимизации сводится к отысканию минимума функционала $J(A)$:

$$J(A^*) = \min_{A \in D_A} J(A), \quad (5)$$

где A^* – вектор оптимальных значений параметров; D_A – допустимая область вектора A .

Итерационная процедура минимизации критерия качества $J(A)$ на основе алгоритма случайного поиска задается рекуррентным выражением:

$$A[k+1] = A[k] + \begin{cases} \gamma S \Xi, & \text{если } J(A[k] + \gamma S \Xi) \leq J(A[k]), \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad k = 0, 1, \dots, \quad (6)$$

где k – номер итерации; γ – общий шаг поиска; S – диагональная матрица коэффициентов, называемых масштабными; $\Xi = (\xi_1, \dots, \xi_m)^T$ – случайный вектор с равномерным законом распределения в интервале $[-1, 1]$.

Элементы s_i диагональной матрицы S определяются соотношениями:

$$s_i = \frac{a_{i\max} - a_{i\min}}{M_s}; \quad i = 1, \dots, 3,$$

где M_s – константа ($M_s > 0$).

В табл. 4 приведены численные значения основных переменных, используемых при оптимизации.

Таблица 4

Численные значения оптимизируемых переменных

Обозначение	Минимальное значение	Начальное значение	Максимальное значение
c_1 , Н/м	4000	250000	400000
k_{1s} , Н·с/м	1000	20000	75000
k_{1o} , Н·с/м	1000	20000	75000

Характеристики подвесок большинства обычных автомобилей должны удовлетворять некоторым среднестатистическим условиям, в которых будет работать данный автомобиль. Желательно, чтобы подвеска оптимизировалась для возможно большего диапазона условий его эксплуатации. Потребуем, чтобы оптимизация проводилась не для отдельной скорости движения, а для некоторого интервала скоростей, например от 10 до 105 км/ч. Таким образом, алгоритм оптимизации на каждом шаге должен находить минимальное среднеквадратичное ускорение поддрессоренной массы среди серий расчетов, каждая из которых представлена набором скоростей из рассматриваемого диапазона. Рассмотрим движение по наиболее тяжелой трассе – грунтовой дороге и первоначально зададим следующие вероятностные условия:

$\bar{P}_s = 0,95$; $\bar{P}_o = 0,95$; $\bar{P}_k = 0,75$. В результате проведенных вычислений из начальной точки (табл. 4) с критерием качества $5,29 \text{ м/с}^2$ на 34 итерации получены следующие параметры: $c_1 = 118643 \text{ Н/м}$; $k_{1s} = 22572 \text{ Н·с/м}$ и $k_{1o} = 6057 \text{ Н·с/м}$. При этом значение критерия качества улучшилось на 31,55 % и составило $3,62 \text{ м/с}^2$.

При ужесточении условий неотрыва колеса ($\bar{P}_k = 0,85$) продолжение поиска оптимальных параметров из предыдущей точки не позволяет сделать удачный шаг вследствие отрывов колеса и достаточно тяжелых условий курсового движения исследуемого объекта. На асфальтовой дороге уровень наблюдаемых ускорений значительно ниже и полученные значения оптимальных параметров элементов подвески не приводят к нарушению более высоких требований по вероятностным характеристикам деформаций упругих элементов.

На рис. 3 приведены сравнительные кривые распределения среднеквадратичных ускорений подрессоренной массы в зависимости от скорости движения машины по грунтовой дороге с параметрами системы подрессоривания, принятыми до проведения процедуры оптимизации и после ее выполнения.

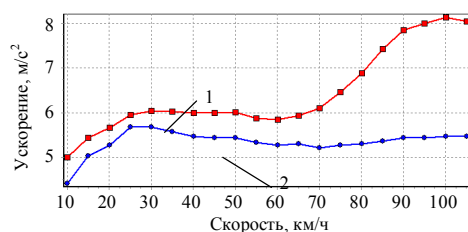


Рис. 3. Распределение среднеквадратичных ускорений подрессоренной массы в начале и в конце оптимизации: 1 — вертикальное ускорение подрессоренной массы машины (исходные параметры); 2 — то же (оптимальные параметры)

ВЫВОД

Изложенные в статье алгоритмы позволяют произвести компьютерное моделирование стохастической среды, оптимизацию параметров системы подрессоривания автомобиля и получить сравнительную оценку ее работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурский, Н. Н. Моделирование и оптимизация колебаний многоопорных машин / Н. Н. Гурский, Р. И. Фурунжиев. — Минск: Изд-во БНТУ, 2008. — 296 с.
2. Гурский, Н. Н. Моделирование, анализ и оптимизация колебаний многоопорных машин / Н. Н. Гурский, Р. И. Фурунжиев // Сб. науч. тр. III Белорусского конгресса по теорет. и прикл. механике / ОИМ НАН Беларуси, Минск, 16–18 окт. 2007 г. — С. 184–191.

Поступила 20.01.2009